

Научная статья
УДК 551.551.3:551.509.329
DOI: 10.31857/S0869769825020079
EDN: GESPXW

Анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над Восточной Сибирью и Дальним Востоком

Е.М. Вербицкая✉, З.В. Вербицкая, С.О. Романский

Евгения Митрофановна Вербицкая

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
werbaem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Зинаида Викторовна Вербицкая

младший научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
derez@ya.ru

Станислав Олегович Романский

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
khvrom@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Аннотация. В статье представлен анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока с января 2020 г. по июль 2024 г. Рассмотрено распределение данных о турбулентности по сезонам года, географическим районам, вертикальным слоям и интенсивности. Получено, что наибольшее количество сообщений о турбулентности поступает с уровней, относящихся к верхней тропосфере. Сообщения из нижней тропосферы относятся в основном к планетарному пограничному слою и содержат информацию только об умеренной и сильной турбулентности преимущественно в окрестности крупных аэродромов. Обсуждается возможность определения типа наблюдаемой турбулентности по данным самолетных сообщений в совокупности с данными наземных и космических наблюдений с целью совершенствования методов прогнозирования турбулентности, опасной для авиационных полетов, по данным численных моделей прогноза погоды.

Ключевые слова: механическая турбулентность, термическая турбулентность, турбулентность в нижних уровнях, метеорологические прогнозы для авиации, Дальний Восток

Для цитирования: Вербицкая Е.М., Вербицкая З.В., Романский С.О. Анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над Восточной Сибирью и Дальним Востоком // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 90–101. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020079>

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 1.4.4.2 Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета на 2020–2024 годы.

Original article

Analysis of the aircraft observations related to atmospheric turbulence in Eastern Siberia and Russian Far East

E.M. Verbitskaya, Z.V. Verbitskaya, S.O. Romanskiy

Eugenia M. Verbitskaya

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
werbaem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Zinaida V. Verbitskaya

Junior Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
derez@ya.ru

Stanislav O. Romanskiy

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
khvrom@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Abstract. In the article, analysis of aircraft observations for atmospheric turbulence on the territories of Eastern Siberia and Russian Far East from January, 2020 to July, 2024 is presented. Observations have been divided by seasons, geographical areas, vertical layers and intensity. The majority of turbulence observations reported from the layers of the upper part of troposphere. Turbulence observations, in the lower part of troposphere, principally, fixed in the planetary boundary layer and showed moderate and severe turbulence near main airports of the region under consideration. Possibility to define type of turbulence based on aircraft, surface and satellite observations and numerical modeling is discussed.

Keywords: mechanical turbulence, thermal turbulence, low-level turbulence, meteorological forecasts for aviation, Far East

For citation: Verbitskaya E.M., Verbitskaya Z.V., Romanskiy S.O. Analysis of the aircraft observations related to atmospheric turbulence in Eastern Siberia and Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 90–101. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020079>

Funding. The work is supported as a part of the theme 1.4.2.2 of the Plan of research and technological works of Roshydromet for 2020–2024.

Введение

Прогнозирование местоположения, продолжительности и интенсивности атмосферной турбулентности имеет существенное значение для обеспечения безопасности авиационных полетов. Разработкой методов и технологий прогноза атмосферной турбулентности

различной природы, опасной для авиационных полетов, над Восточной Сибирью и Дальним Востоком России и прилегающими территориями (в том числе над акваториями дальневосточных морей) занимается ФГБУ «Дальневосточный научно-исследовательский региональный гидрометеорологический институт» (ДВНИГМИ) [1] на базе численной атмосферной модели Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [2]. Такие работы особенно актуальны, с учетом полного отсутствия специальных разработок этого направления для рассматриваемой территории в отечественной и тем более зарубежной практике.

Прогнозы турбулентности в верхней тропосфере (турбулентность ясного неба – ТЯН) выпускаются зональными центрами по данным глобальных моделей зарубежных метеорологических центров Вашингтон (США), Лондон (Великобритания) на стандартных изобарических поверхностях с достаточно большим горизонтальным шагом сетки (1,25°, что составляет около 125–140 км в средних широтах). Для больших высот такое разрешение можно считать удовлетворительным.

Для прогноза турбулентности в нижней тропосфере (в нижних уровнях), особенно в пограничном слое атмосферы, необходимо существенно более детальное пространственное разрешение сетки прогностической модели, как по горизонтали, так и по вертикали. Кроме того, необходимо достаточно подробное описание рельефа подстилающей поверхности. Для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока прогнозирование турбулентности в нижних уровнях особенно важно в связи с интенсивным использованием легких воздушных судов, которые летают на относительно небольших высотах, в условиях практически полного отсутствия других видов транспорта между населенными пунктами в труднодоступной местности.

Для производства таких прогнозов необходимо иметь результаты расчетов системы численного прогноза погоды (ЧПП) высокого пространственного разрешения. В настоящее время в качестве базовой модели ЧПП в Дальневосточном регионе России используется модель WRF-ARW на сетках различного пространственного разрешения.

В средней и верхней тропосфере подробное горизонтальное разрешение модели тоже имеет важное значение, поскольку в расчете широко применяемых индексов [3, 4], по значениям которых определяют наличие и интенсивность турбулентных пульсаций, участвуют пространственные производные скорости ветра. При этом масштабы турбулентных вихрей, влияющих на болтанку воздушных судов, находятся в пределах от десятков метров до нескольких километров [4]. Необходимо также и хорошее вертикальное разрешение модели, так как наиболее существенным фактором возникновения ТЯН является вертикальный сдвиг горизонтального ветра [4, 5].

Основным фактором, определившим проведение исследования, является задача разработки отечественных технологий прогноза опасных для авиации явлений погоды, как для территории России в целом, так и для отдельных ее регионов, в частности для Восточной Сибири и Дальнего Востока, имеющих свою климатическую и физико-географическую специфику. В статье приводится анализ накопленных к настоящему времени (с января 2020 г. по июль 2024 г.) данных самолетных наблюдений за турбулентностью над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока России, используемых для разработки методов прогноза атмосферной турбулентности различных типов, а также верификации прогнозов.

Сводки наблюдений с бортов воздушных судов

В процессе исследований по разработке и адаптации методов диагноза и прогноза наличия и интенсивности турбулентности по модельным данным используются сводки наблюдений, поступающие с бортов воздушных судов (ВС) в кодовой форме AIREP. Примеры бортовых сообщений и их расшифровки приведены в табл. 1, где указана расшифровка сообщения (дата и время выпуска сообщения, источник информации (код борта ВС), географические координаты места наблюдения, высота или интервал высот, на которых наблюдалось явление, и его интенсивность), в последнем столбце размещен исходный текст сводки.

Как известно, атмосферная турбулентность имеет различную природу, т.е. формируется различными атмосферными процессами или их совокупностью [4–7]. Определение наблю-

Примеры сводок AIREP с данными о турбулентности

Срок наблюдения		Источник информации	Координаты		Высота, м	Интенсивность	Текст сообщения
дата	время (BCB)		с. ш.	в. д.			
4 мая 2020 г.	4:43	MI-8	52,5°	158,1°	0–300	Сильная	UARA61 RUPK 040444 ARS MI-8 SEV TURB OBS AT 0443Z N5250E15810 FL000/010=
13 декабря 2021 г.	16:19	SU95	64,44°	177,44°	0–60	Сильная	UARA61 RUMG 130431 ARS SU95 SEV TURB OBS AT 1619Z N6444E17744 SFC/FL002=
30 марта 2020 г.	8:03	UTA138	53,09°	103,47°	2450– 4250	Умеренная	UARA61 RUIR 300805 ARS UTA138 MOD TURB OBS AT 0803Z N5309E10347 FL080/140=
12 октября 2020 г.	14:55	UAL2809	41,52°	173,5°	11900	Легкая	ARP UAL2809 4152N 17350E 1455 F390 264/139KT TB OCNL LGT CHOP IC=
13 января 2022 г.	5:20	UAL868	62,58°	91,28°	10650	Нет	UAUS31 KWBC 130524 ARP UAL868 6258N 09128E 0520 F350 MS63 337/056KT TB NONE SK CLEAR

Примечание. BCB – всемирное скоординированное время.

даемого типа турбулентности существенно при численном моделировании исследуемого явления. В сообщения AIREP иногда добавляют уточнения о типе турбулентности на больших высотах (более 9000 м): в ясном небе или в облачности. Но такие уточнения встречаются крайне редко, поэтому для определения типа турбулентности в средней и верхней тропосфере нужно привлекать данные о наличии и высоте облачности в окрестности указанных координат. В нижней тропосфере такие уточнения невозможны из-за сложной (часто комплексной) природы явления. Здесь для определения типа турбулентности необходимо использовать информацию наземных наблюдений и атмосферного радиозондирования в окрестности заданной точки, а если местоположение фиксации турбулентности BC удалено от пунктов наблюдений, необходимо привлекать данные численного моделирования.

Анализ сообщений о турбулентности

В табл. 2 представлена статистика данных наблюдений за турбулентностью от бортов воздушных судов, поступивших с рассматриваемой территории за период с января 2020 г. по июль 2024 г.

В исследуемой выборке всего 59 665 сообщений, что в среднем составляет 40 сводок в сутки и соответствует интенсивности полетов BC над рассматриваемой территорией

**Статистика сводок о турбулентности над территорией Восточной Сибири
и Дальнего Востока с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.**

Сезон года	Общее число сводок	Из них с данными о турбулентности				
		всего	отсутствует	легкая	умеренная	сильная
Зима	13 849 (23%)	174 (18,6%)	7 (4,0%)	11 (6,3%)	148 (85,1%)	8 (4,6%)
Весна	17 505 (29%)	332 (35,6%)	6 (1,8%)	20 (6,0%)	296 (89,2%)	10 (3,0%)
Лето	11 957 (20%)	241 (25,8%)	0 (0,0%)	14 (5,8%)	222 (92,1%)	5 (2,1%)
Осень	16 354 (27%)	187 (20,0%)	5 (2,7%)	23 (12,3%)	151 (80,7%)	8(4,3%)
Всего	59 665	934 (1,6%)	18 (1,9%)	68 (7,3%)	817 (87,5%)	31 (3,3%)

(с учетом снижения количества полетов в период пандемии 2020–2021 гг.). Из общего числа сообщений сведения о турбулентности содержат 934 сводки (1,6%). Максимальное количество сводок приходится на весну: 332 сообщения, что составляет 35,6% от общего числа сообщений с информацией о турбулентности. Меньше всего сводок, содержащих данные о турбулентности, поступило зимой – 174 сообщения (18,6%), т.е. практически в 2 раза меньше, чем весной. Летом и осенью количество сообщений о турбулентности также существенно меньше, чем весной, но несколько больше, чем в зимний период. При этом, если сводки с данными об отсутствии турбулентности не рассматривать, то процентные соотношения практически не изменяются. Подавляющее количество сообщений приходится на турбулентность умеренной интенсивности.

В табл. 3 приводится распределение данных о наличии турбулентности по рассматриваемой территории (без сообщений об отсутствии турбулентности). Всего учтено 910 сообщений, так как 18 сообщений содержали информацию об отсутствии турбулентности (все они относятся к верхней тропосфере), и в 6 сообщениях нет данных о географических координатах места наблюдения. Данные табл. 3 проиллюстрированы на рис. 1. Очевидно, что распределение общего количества сообщений о наличии турбулентности по рассматриваемой территории зависит прежде всего от интенсивности полетов ВС над конкретным регионом.

Распределение сезонных данных по высотам. Как сказано выше, формирование турбулентных движений в атмосфере обусловлено различными причинами. В нижней тропосфере основными факторами возникновения турбулентности являются трение воздушного потока о земную поверхность (механическая турбулентность), различие в нагреве отдельных участков земной поверхности солнечной радиацией (термическая турбулентность) и деформация воздушного потока, вызываемая обтеканием неровностей земной поверхности (орографическая турбулентность).

Турбулентность в верхней тропосфере возникает в основном за счет пульсаций скорости ветра, обусловленных пространственным сдвигом вектора ветра. Турбулентность в средней тропосфере обусловлена преимущественно наличием облачности, в отсутствие облачности ее можно отнести к турбулентности ясного неба.

В табл. 4 представлено распределение данных о турбулентности над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока по высотам в различные сезоны года. Наибольшее количество сообщений о наличии турбулентности получено из верхней тропосферы – в целом по выборке 68%. Второе место по числу сообщений занимает турбулентность в нижней тропосфере (20%), преимущественно в планетарном пограничном слое. В облакосодержащем слое (3–6 км от уровня земли) турбулентность отмечена в 8% сообщений. Наименьшее число сообщений

**Распределение данных о наличии турбулентности по географическим районам
Восточной Сибири и Дальнего Востока с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.**

Количество сводок с данными о турбулентности					
с. ш.	в. д.				Всего
	До 100°	100–140°	140–180°	От 180°	
Выше 60°	20	33	37	–	90
50–60°	142	241	126	2	511
40–50°	3	84	111	7	205
Ниже 40°	2	40	56	6	104
Всего	167	398	330	15	910
Количество сводок о турбулентности категорий: легкая/умеренная/сильная					
Выше 60°	1/17/2	0/31/2	0/35/2	Нет	1/83/6
50–60°	0/139/3	0/233/8	3/118/5	0/2/0	3/49/16
40–50°	0/3/0	2/79/3	31/75/5	3/4/0	36/161/8
Ниже 40°	1/1/0	7/33/0	15/40/1	5/1/0	28/75/1
Всего	2/160/5	9/376/13	49/268/13	8/7/0	68/811/31

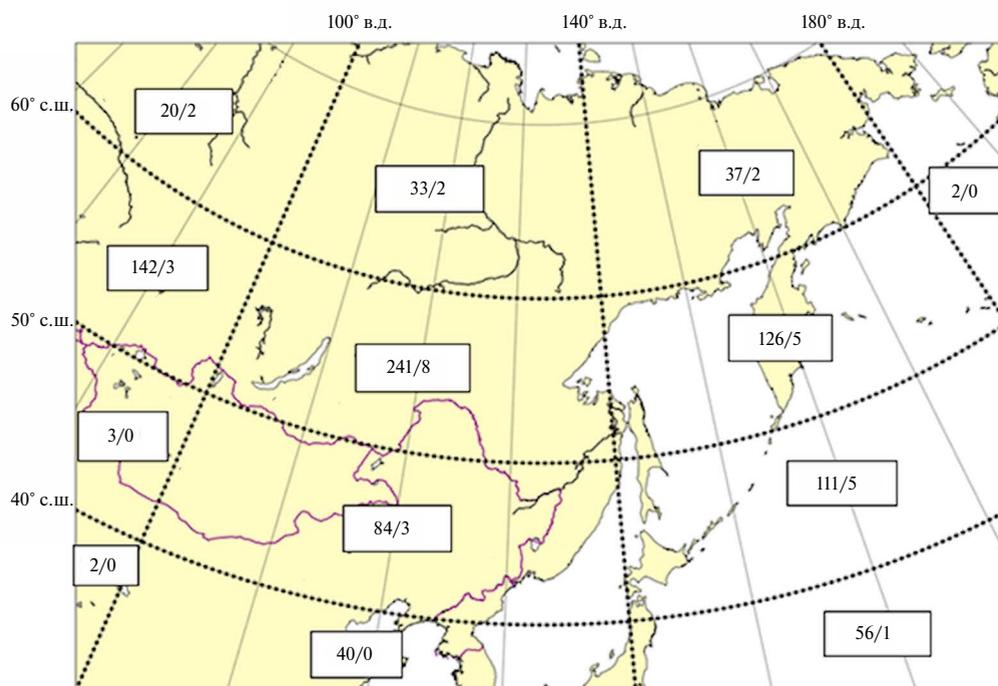


Рис. 1. Распределение общего количества сообщений о турбулентности по территории. Указано общее количество сообщений о наличии турбулентности, через дробь – количество сообщений о сильной турбулентности

Распределение сообщений о турбулентности над Восточной Сибирью и Дальним Востоком по высотам в сезоны года с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.

Сезон	Сообщения о турбулентности					
	Высота от уровня земли, км	Всего	Нет	Легкая	Умеренная	Сильная
Зима (177 сводок)	Ниже 3	52 (30%)	–	–	49	3
	3–6	12 (7%)	–	–	12	–
	6–9	4 (2%)	–	–	4	–
	Выше 9	106 (61%)	7	11	83	5
	Всего	174	7	11	148	8
Весна (346 сводок)	Ниже 3	82 (25%)	–	–	81	1
	3–6	27 (8%)	–	–	27	–
	6–9	16 (5%)	–	–	15	1
	Выше 9	207 (62%)	6	20	173	8
	Всего	332	6	20	296	10
Лето (242 сводки)	Ниже 3	18 (8%)	–	–	18	–
	3–6	15 (6%)	–	–	15	–
	6–9	7 (3%)	–	–	7	–
	Выше 9	201 (83%)	–	14	182	5
	Всего	241	–	14	222	5
Осень (192 сводки)	Ниже 3	35 (19%)	–	–	33	2
	3–6	16 (9%)	–	–	16	–
	6–9	10 (5%)	–	1	9	–
	Выше 9	126 (67%)	5	22	93	6
	Всего	187	5	23	151	8
Всего (957 сводок)	Ниже 3	187 (20%)	–	–	181	6
	3–6	70 (8%)	–	–	70	–
	6–9	37 (4%)	–	1	35	1
	Выше 9	640 (68%)	18	67	531	24
	Всего	934	18	68	817	31

(4%) приходится на нижние слои верхней тропосферы (6–9 км от уровня земли). Распределение процентного соотношения сообщений о турбулентности по вертикальным слоям атмосферы имеет выраженный сезонный ход в нижней и верхней тропосфере и практически равномерный по сезонам года в средней тропосфере.

Турбулентность в верхней тропосфере имеет максимальную повторяемость летом (83%) и минимальную зимой (61%) и весной (62%). Это обусловлено двумя основными

факторами: общим снижением высоты тропосферы в холодный период года в Северном полушарии и развитием мощных конвективных процессов в теплый период года. Летом на Дальнем Востоке России конвективная облачность часто достигает высоты тропопаузы с верхней границей до 12–14 км.

Повторяемость турбулентности в нижних уровнях, напротив, максимальна зимой (30%) и минимальна летом (8%). Очевидно, зимой на рассматриваемой территории термическая турбулентность формируется редко. Механическая и особенно орографическая турбулентность зимой возникает часто за счет устойчивой стратификации атмосферы при относительно сильных ветрах (более 7 м/с) в горной и холмистой местности, которая занимает подавляющее большинство территории Восточной Сибири и Дальнего Востока и является следствием развития горных волн [8]. Весной термическая турбулентность усиливается за счет неравномерного прогрева подстилающей поверхности в континентальных районах и существенных градиентов температуры между сушей и морем в прибрежных и островных территориях. В совокупности с существенными перепадами высот турбулентность в нижней тропосфере на рассматриваемой территории часто носит комплексный характер.

Определение типа наблюдаемой турбулентности. Турбулентность в нижних уровнях атмосферы, как правило, имеет комплексную природу в силу одновременного воздействия нескольких факторов. Из-за небольших высот такая турбулентность главным образом отмечается воздушными судами в непосредственной близости от аэродромов (при взлете или посадке), где проводятся систематические метеорологические наблюдения, как наземные (данные в коде METAR поступают каждые 30 мин), так и аэрологические (2 раза в сутки в 00 ч и 12 ч ВСВ). Наличие, интенсивность, местоположение и продолжительность турбулентности в нижней тропосфере определяются скоростью и направлением ветра у земли и в планетарном пограничном слое, стратификацией атмосферы, шероховатостью земной поверхности и типом подстилающей поверхности. Поэтому, привлекая данные метеорологических и аэрологических наблюдений и зная физико-географические условия в окрестности точки наблюдения, указанной в сообщении о турбулентности, можно определить преобладающий тип наблюдаемой турбулентности: термическая, механическая, орографическая или комплексная.

Для примера рассмотрим сообщение, приведенное в первой строке табл. 1. Сообщение поступило с борта вертолета Ми-8 из точки с координатами (52,5° с. ш.; 158,1° в. д.), т.е. из района Авачинской бухты. Сильная турбулентность наблюдалась около 4:43 ВСВ 4 мая 2020 г. в слое 0–300 м. Ближайший пункт атмосферного радиозондирования находится в г. Петропавловск-Камчатский на расстоянии около 30 км, т.е. эти данные на высотах являются показательными. По аэрологическим и модельным данным днем 4 мая в окрестности указанной точки стратификация атмосферы была неустойчивой, что в совокупности с данными о скорости и направлении ветра у земли исключает формирование горных волн. Горизонтальные градиенты температуры воздуха над прогретой поверхностью земли и холодными водами бухты свидетельствуют о наличии условий для развития термической турбулентности, а сложный рельеф местности обуславливает формирование механической турбулентности.

На рис. 2 представлена иллюстрация вышеприведенного анализа картами прогноза механической (рис. 2, а) и термической (рис. 2, б) турбулентности, построенными по расчетам, выполненным на основе прогностической продукции модели WRF-ARW с горизонтальным шагом сетки 15 км. Видно, что основной вклад в окрестности точки фиксации сильной турбулентности в нижних уровнях вносит механическая турбулентность, которую дополняет термическая. Таким образом, наблюдаемое явление носит комплексный характер.

Пример развития механической турбулентности приведен во второй строке табл. 1. Это сообщение поступило от рейсового борта SU-95 в 16:19 ВСВ 13 декабря 2021 г. из окрестности аэродрома Угольный (г. Анадырь). В декабре на Чукотке установились полярная ночь и плотный ледяной покров в Анадырском лимане. Нет суточного прогрева подстилающей поверхности, так же, как и градиентов температуры «суша–море». Стратификация атмосферы устойчивая. Пункт радиозондирования расположен в г. Анадырь. Приземный северный ветер со скоростью 10–12 м/с может создавать зоны сжатия воздуха на наветренной стороне Золотого хребта и горную волну на подветренной стороне вблизи аэродрома.

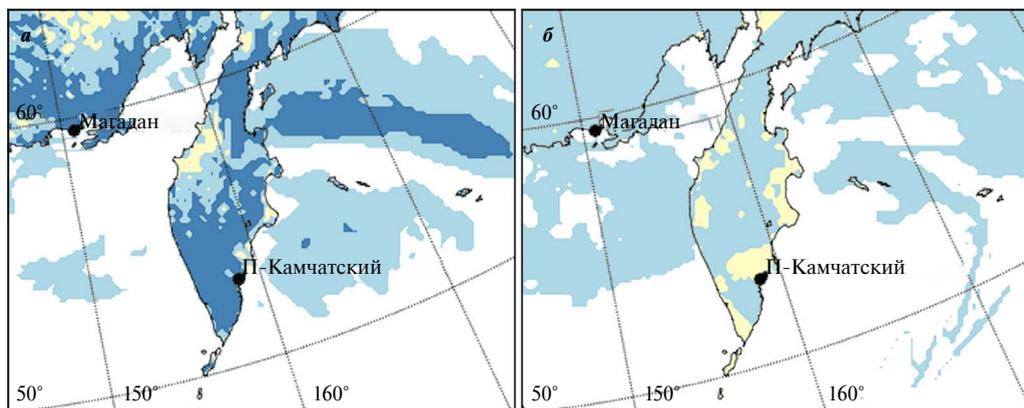


Рис. 2. Прогноз механической (а) и термической (б) турбулентности по данным модели WRF–ARW на 4 ч ВСВ 4 мая 2020 г. (темной и светлой заливкой указаны соответственно умеренная и слабая турбулентность)

Иллюстрация вышеприведенного анализа представлена на рис. 3 картами прогноза механической и термической турбулентности, построенными по модельным данным. На картах отчетливо видны вкрапления сильной механической турбулентности в окрестности г. Анадырь (рис. 3, а) и отсутствие даже легкой термической турбулентности у побережья Анадырского залива (рис. 3, б).

Распределение сообщений о турбулентности в нижней тропосфере представлено на рис. 4. Детализация приведена только для территории Дальнего Востока и Восточной Сибири, т.е. зоны ответственности ФГБУ ДВНИГМИ, хотя в область расчета модели WRF–ARW входит и восточная часть Среднесибирского региона. Приведенные на рис. 4 данные показывают, что сообщения о турбулентности в нижней тропосфере поступают из окрестности достаточно крупных аэродромов (аэрд.), с относительно большой интенсивностью полетов ВС. Так, с Чукотского полуострова из 7 сообщений 5 поступило из аэрд. Угольный (г. Анадырь). В квадранте (50–60° с. ш.; 140–180° в. д.), охватывающем Камчатку, почти все сообщения относятся либо к аэрд. Сокол (г. Магадан) – 36 сообщений (из них 2 о сильной турбулентности) и 29 из аэрд. Елизово (г. Петропавловск-Камчатский) или его ближайшего окружения (окрестностей Авачинской бухты). Из 26 сообщений средних широт Восточной

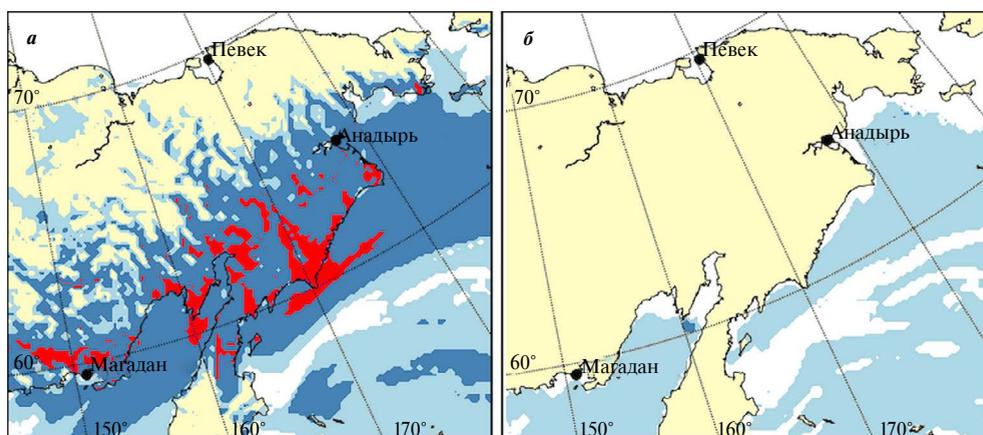


Рис. 3. Прогноз механической (а) и термической (б) турбулентности по данным модели WRF–ARW на 16 ч ВСВ 13 декабря 2021 г. (яркость заливки соответствует интенсивности турбулентности: сильная, умеренная, слабая)

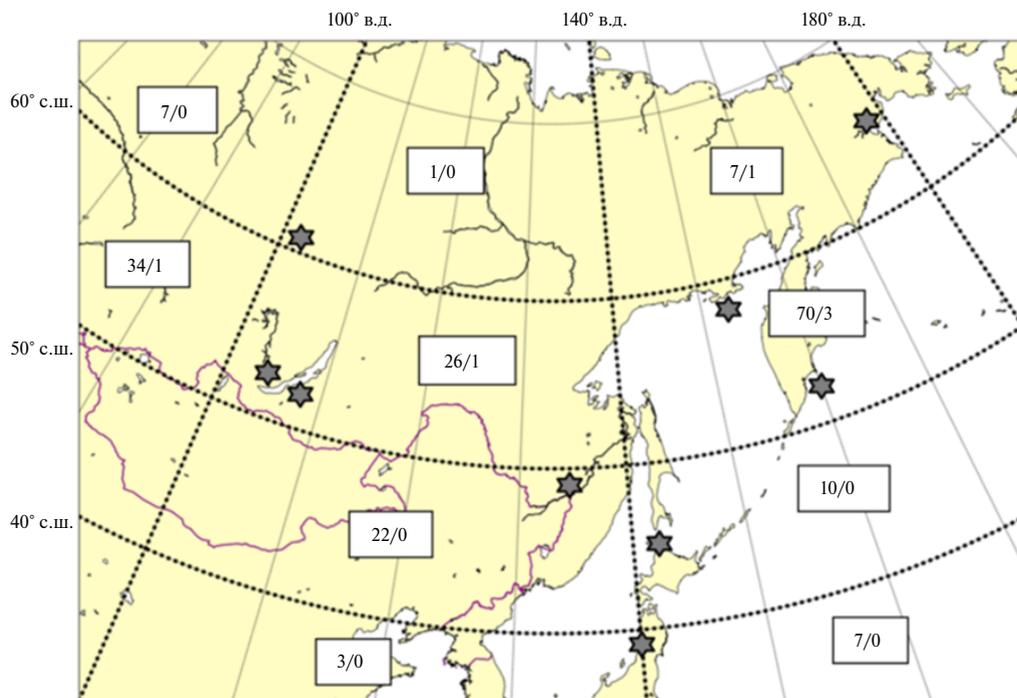


Рис. 4. Распределение сообщений о турбулентности в нижней тропосфере по территории. Обозначения как на рис. 1. Звездочками отмечены места преимущественной локализации сообщений на территории квадранта

Сибири и материковой части Дальнего Востока 20 поступило из аэрд. Кадала г. Иркутск (8 сводок) и аэрд. Байкал г. Улан-Удэ (12). Южнее, в квадранте, содержащем Монголию, часть Китая, Приморье и юг Хабаровского края, из 22 сообщений 18 поступила из аэрд. Новый (г. Хабаровск). Восточнее на тех же широтах основным источником сообщений является аэродром, расположенный на северной оконечности о-ва Хоккайдо (10 сводок). И, наконец, южнее 40° с. ш. единственный источник сообщений о турбулентности нижних уровней расположен на северо-западе о-ва Хонсю.

В непосредственной близости от всех перечисленных источников информации расположены пункты радиозондирования, а на территории аэродромов ведутся наземные наблюдения. Это дает возможность определять тип наблюдавшейся турбулентности, настраивать методы прогноза того или иного типа турбулентности, проводить их калибровку (настраивать дискриминантные значения индексов, отделяющие классы интенсивности: «нет или слабая», «умеренная», «сильная») и верифицировать модельные прогнозы турбулентности. Заметим, что сообщений о слабой турбулентности в нижней тропосфере не поступает, т.е. по имеющимся данным наблюдений можно откалибровать только умеренную и сильную турбулентность.

Аналогично по данным аэрологических наблюдений в окрестности точки с указанными в сообщении координатами и/или спутниковым снимкам облачности можно определить тип наблюдаемой турбулентности в средней и нижней части верхней тропосферы. На больших высотах (более 9000 м) наблюдаемая турбулентность относится преимущественно к ТЯН. На рис. 5 представлено распределение сообщений о наличии турбулентности в верхней тропосфере. Очевидно, сообщения о турбулентности в свободной атмосфере, особенно в верхней тропосфере, не привязаны к местоположению аэродромов. Их количество в определенной степени связано с положением авиационных трасс. В них представлены данные по всем видам интенсивности, в том числе и об отсутствии явления, что дает возможность провести калибровку модельных прогнозов и выполнить их проверку.

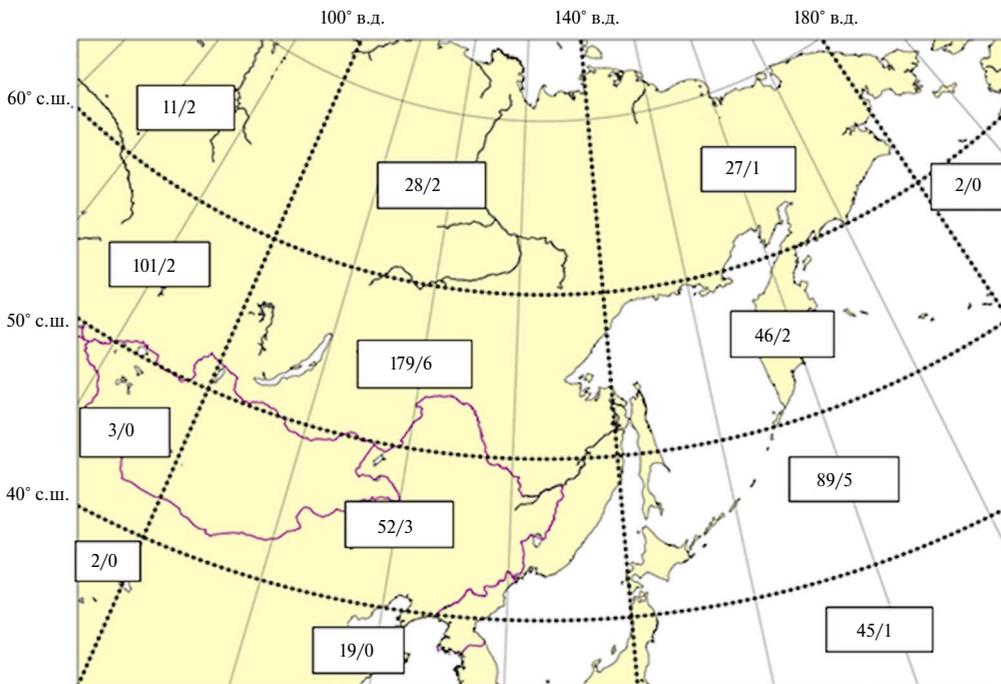


Рис. 5. Распределение сообщений о турбулентности в верхней тропосфере по территории. Обозначения как на рис. 1

Результаты и выводы

В статье представлено распределение данных самолетных наблюдений об атмосферной турбулентности по сезонам года, атмосферным слоям (высотам) и территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Показано, что наибольшее количество сообщений о турбулентности поступает с высот, относящихся к верхней тропосфере. Здесь дается наиболее полная информация об интенсивности явления, поступают также данные об отсутствии турбулентности. Сообщения из нижней тропосферы относятся преимущественно к планетарному пограничному слою и несут в себе информацию только об умеренной и сильной турбулентности в окрестности крупных аэродромов, где есть данные наземных наблюдений и радиозондирования. Обсуждается возможность определения типа наблюдаемой турбулентности по данным самолетных сообщений в совокупности с данными метеорологических наблюдений, спутниковых снимков облачности и модельных прогнозов. Отмечено, что такая информация представляет безусловную ценность при проведении исследований по численному моделированию и прогнозированию атмосферной турбулентности: ее отдельных типов и совокупной реализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Использование высокопроизводительной вычислительной техники для численного моделирования и прогнозирования опасных для авиации явлений погоды в Дальневосточном регионе // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы VI Международной научно-практической конференции (Хабаровск, 14–16 сентября 2021 г.). Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. С. 40–45.
2. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X. A description of the advanced research WRF model version 4 (No. NCAR/TN-556+STR). Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

3. Lee D., Chun H., Kim S., Sharman R.D., Kim J. Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and *in situ* flight turbulence observation data // *Weather and Forecasting*. 2022. Vol. 37. P. 371–392. DOI: 10.1175/WAF-D-22-0086.1.
4. Sharman R.D., Lane T. (Eds.) *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
5. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 288 с.
6. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 414 с.
7. Foudad M., Sanchez-Gomez E., Jaravel T., Rochoux M., Terray L. Past and future trends in clear-air turbulence over the Northern Hemisphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129. e2023JD040261. DOI: 10.1029/2023JD040261.
8. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.

REFERENCES

1. Verbickaja E.M., Romanskij S.O. Ispol'zovanie vysokoproizvoditel'noj vychislitel'noj tehniki dlja chislennogo modelirovaniya i prognozirovaniya opasnyh dlja aviacii javlenij pogody v Dal'nevostochnom regione. In: *Informacionnye tehnologii i vysokoproizvoditel'nye vychisleniya: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Habarovsk, 14–16 sentjabrja 2021 g.). Habarovsk: Tihookeanskij Gosudarstvennyj Universitet; 2021. S. 40–45. (In Russ.).
2. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X. A description of the advanced research WRF model version 4 (No. NCAR/TN-556+STR). Boulder: National Center for Atmospheric Research; 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
3. Lee D., Chun H., Kim S., Sharman R.D., Kim J. Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and *in situ* flight turbulence observation data. *Weather and Forecasting*. 2022;37:371–392. DOI: 10.1175/WAF-D-22-0086.1.
4. Sharman R.D., Lane T. (Eds.) *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
5. Vinnichenko N.K., Pinus N.Z., Shmeter S.M., Shur G.N. Turbulentnost' v svobodnoj atmosfere. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. 288 s. (In Russ.).
6. Obuhov A.M. Turbulentnost' i dinamika atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984. 414 s. (In Russ.).
7. Foudad M., Sanchez-Gomez E., Jaravel T., Rochoux M., Terray L. Past and future trends in clear-air turbulence over the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024;129. e2023JD040261. DOI: 10.1029/2023JD040261.
8. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge university press; 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.